

多端口柔性互联装置硬件在环仿真测试研究

夏琦璋¹, 韩国强¹, 桑亚维², 何英广², 董家圆²

(1. 华电莱州发电有限公司, 山东 莱州 261400; 2. 北京四方继保工程技术有限公司, 北京 100890)

摘要:配电网因智能软开关、DC/DC 等电力电子设备的接入而变得更柔性化,柔性互联逐渐成为配电网网架升级和灵活调控能力提升的重要技术手段。而多端口柔性互联装备可以实现能量变换、潮流调控等功能,进而促进新能源利用与消纳。本文针对提出的多端口柔性互联装置拓扑,开展示范工程前期的硬件在环测试研究。首先,介绍了多端口柔性互联装置的拓扑结构及各端口配置,设计了柔性互联装置控制保护系统架构和分层协调控制系统。然后,基于构网型控制技术设计了柔性互联装置的控制策略,在此基础上开展包含 RTLAB 联调架构、阀基控制设备设计、阀控策略设计等部分的硬件在环测试方案设计。最后,针对充电、解锁、阶跃试验、孤岛/联网运行方式切换、故障穿越等典型工况开展硬件在环测试研究,试验波形证实了所搭建平台的可靠性和准确性,为示范工程厂内联调测试和现场调试提供依据和技术支撑。

关键词:柔性互联; 新能源; 孤岛/联网; 构网; 硬件在环

Research on Hardware-in-the-loop Simulation Testing of a Multi-port Flexible Interconnection Device

XIA Qizhang¹, HAN Guoqiang¹, SANG Yawei², HE Yingguang², DONG Jiayuan²

(1. Huadian Laizhou Power Generation Co., Ltd., Shandong Laizhou 261400, China;

2. Beijing Sifang Jibao Engineering Technology Co., Ltd., Beijing 100890, China)

Abstract: The distribution network has become more flexible due to the integration of such power electronic devices as intelligent soft switches and DC/DC converters. Flexible interconnection is gradually emerging as a key technological approach for upgrading the distribution network framework and enhancing its flexibility regulation capability. Multi-port flexible interconnection devices can achieve such functions as energy conversion and power regulation, thereby promoting the utilization and consumption of renewable energy. As for the multi-port flexible interconnect device topology proposed in this paper, the hardware-in-the-loop testing research in the pre-demonstration stage is performed. First, the topology structure and each port configuration of the multi-port flexible interconnection device are introduced, and the secondary equipment architecture and hierarchical coordinated control system of the control and protection system of the multi-port flexible interconnection device are designed. Then, the control strategy of the flexible interconnection device is designed based on the grid forming control technology and, on this basis, the hardware-in-the-loop testing scheme design, including RTLAB joint debugging architecture, valve based control equipment design, is performed. Finally, the hardware-in-the-loop testing research is carried out for such typical operating conditions as charging, unlocking, step testing, islanding/grid - connection switching as well as fault-ride-through. The test waveforms confirm the reliability and accuracy of the constructed platform, providing a basis and technical support for the factory integration test and on-site commissioning of the demonstration project.

Keywords: flexible interconnection; renewable energy; islanding/grid - connected; grid forming; hardware-in-the-loop

0 引言

随着风电、光伏及电动汽车等具备随机波动性负荷的不断接入,配电网的稳定运行不能再仅仅依靠扩大容量或者配备储能等手段。为了实现含高比例新能源的配电网稳定、可靠运行,促进新能源的利用与消纳,采用大容量多端口柔性互联装置进行区域能量管理,为风电和光伏等分布式能源、电动汽车和储能、各类型交直流负荷的接入提供更加智能化接口,在满足配电网对电压、频率等电能质量的要求下,更加灵活的实现台区/县域内电网的能量管理和功率分配,保证整个区域电网电能的动态平衡,是当前学者竞相研究的焦点^[1-3]。

目前,国内外研究机构已针对柔性互联装置进行了大量理论研究,并在工程应用方面开展了初步分析。美国北卡州立大学的 FREEDM 项目研发的第 1 代电力电子变压器是一种典型的柔性互联拓扑,但受限于器件的自身特性,高压整流环节、DC/DC 变换环节和低压逆变侧 3 者的开关频率之间彼此不能够完美匹配,影响了其动态性能,同时存在体积庞大、运行噪音大等缺点^[4]。FREEDM 采用更高电压等级(15 kV)的 MOSFET 开关管对第 1 代电力电子变压器进行了改进,在提高开关频率的同时减小体积,并提供交直流低压接口且能量可以在各端口间流动,具有更优越的功率传递功能^[5]。瑞士苏黎世理工大学采用中点钳位三电平结构设计了容量为 1 MVA 电力电子变压器结构,降低了模块数量^[6]。UNIFLEX-PM 探索的柔性互联装置采用背靠背形式的多电平结构,通过使用逆变输出端与 DC/DC 进行交错连接的手段实现三相间的功率动态平衡,该拓扑结构可实现能量多向流动。但因拓扑中缺少直流端口,对于光伏和储能等直流模块的接入不方

便^[7-8]。美国电科院提出采用级联 H 桥的电力电子变压器拓扑结构,但受限于所采用的二极管整流电路自身结构特点,无法实现能量的多向流动^[9]。中科院电工所在 2019 年投运同里综合能源服务中心用柔性互联装置工程^[10],该工程提供交流侧电压输入 10 kV,直流输出 ± 10 kV 和 ± 375 V,交流输出 380 V,单端口最大容量 3 MW。采用输入级模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)骨架、隔离级 DC/DC 变换器和输出级三级式方案。南方电网公司针对交直流混合配电网在广东珠海开展“互联网+”智慧能源示范项目^[11],该柔性互联工程包含 ± 10 kV 电压等级的 MMC、三端口的 DC/DC 及直流断路器,可以实现潮流和电压的调节,大幅度提高了可再生能源的利用率,提高了直流负载侧供电的可靠性。综上所述,国内外有关柔性互联装置研究主要集中于中低压配电网,电压等级较低(10 kV 及以下)、容量较小(20 kVA~3 MVA),尚未见到 10 kV 以上大容量样机试制或工程应用的报道。

硬件在环仿真测试作为多端口示范工程应用前期厂内联调试验验证的重要环节,本文针对所提出的多端口柔性互联装置开展硬件在环测试平台的开发和搭建。设计了多端口柔性互联装置控制保护系统二次架构和分层协调控制系统。设计了 RTLAB 联调架构、阀基控制设备设计等在内的完整硬件在环测试方案。最后,针对一系列典型工况开展硬件在环测试研究。本文硬件在环测试平台的开发和测试为示范工程的落地实施提供强有力的技术支撑。

1 多端口柔性互联装置电气拓扑

本文提出的多端口能量柔性互联装置电气拓扑结构如图 1 所示。

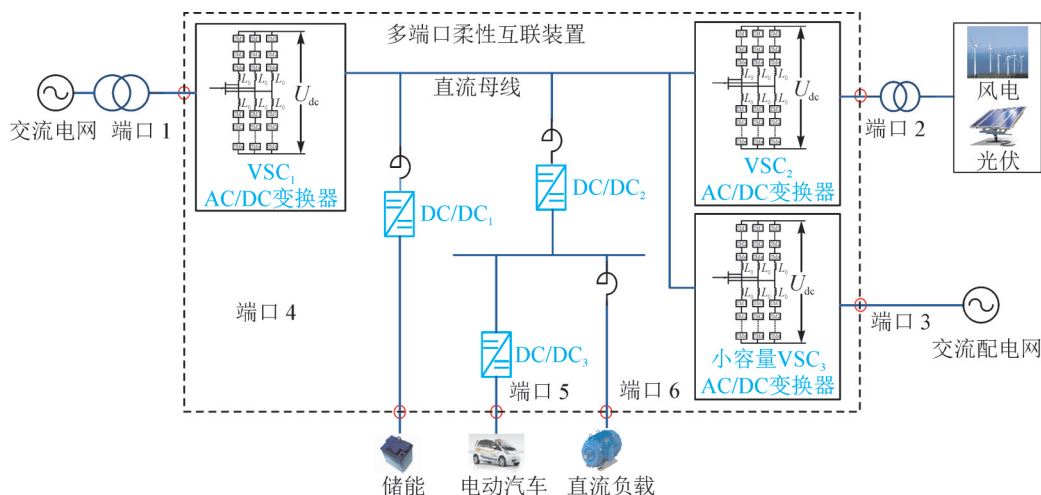


图 1 多端口柔性互联装置拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of multi-port flexible interconnection device

图1具有6个端口,便于分布式新能源、储能系统、电动车充电站、直流负载等的灵活接入。AC/DC换流器VSC₁~VSC₃均采用MMC换流器拓扑,为实现多个端口间的能量转换,各端口主体设备配置如下:

- 1)连接交流大电网的交流端口1和新能源接入端口2之间通过VSC₁、VSC₂以背靠背方式相连,从而实现两侧互联交流母线间功率的灵活、柔性调控;
- 2)交流配电网端口3通过小容量的VSC₃连接到直流母线,另一端连接10 kV配电网;
- 3)储能接入端口4通过DC/DC与直流母线相连接,该端口所接储能既可用于平抑端口2风电、光伏发电引起的功率波动,起到调压和调峰作用,也可以作为电网的启动电源;
- 4)电动汽车接入端口5和直流负载端口6通过DC/DC接入直流母线。

2 分层协调控制系统

多端口柔性互联装置控制保护二次系统架构如图2所示。主要设备包括源、网、荷、储协同控制系统、柔性装置协控系统,操作人员工作站(operator work station, OWS)和服务器,换流器VSC₁~VSC₃的控制保护系统以及直流变压器DC/DC₁~DC/DC₃的控制系统等。柔性互联装置协控系统与源、网、荷、储协同控制系统之间进行通信并接收系统指令。

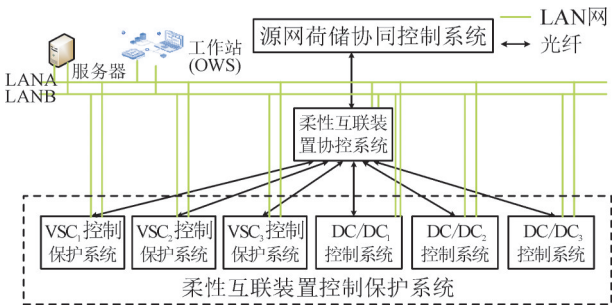


图2 柔性互联装置二次系统架构
Fig. 2 Secondary system architecture of flexible interconnection device

当换流器与协控通信故障时,先尝试切换系统,如果仍通信故障,换流器可继续运行,由运行人员从后台下发控制指令和参考值。

在柔性互联装置示范工程中,整个协调控制系统分为3层:源网荷储协同控制系统层、柔性装置协控系统层和换流器控制系统层。源网荷储协同控制系统层根据当前系统运行状态向柔性互联装置发送运行模式切换命令,柔性装置协控系统接收到运行模式命令后,通过换流器控制系统层调整

VSC₁~VSC₃和3个DC/DC的运行模式^[12-18]。

3 多端口柔性互联装置控制策略

柔性互联装置示范工程外部接线如图3所示,多端口柔性互联装置通过断路器K₁的分合可以处于孤岛和联网模式,各个变换器在两种运行模式下的控制方式见表1所示。

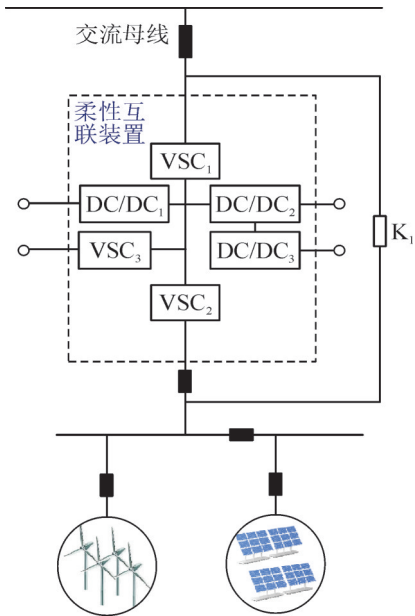


图3 柔性互联装置示范工程接线方式
Fig. 3 Wiring mode of flexible interconnection device demonstration project

表1 换流器的控制方式
Table 1 Control modes of converters

运行方式	K ₁	VSC ₁	VSC ₂	VSC ₃	DC/DC
孤岛运行	分	直流电压	下垂控制	VF控制	恒电流
联网运行	合	直流电压	定PQ	VF控制	恒电流

VSC₁采用定直流电压 U_{dc} 控制,VSC₂换流器采用构网型(下垂+VF)控制建立电压和频率,进行控制策略的详细设计如下:

1)定直流电压 U_{dc} 控制。根据直流电压的参考值 u_{dc_ref} 来实现有功功率的控制,从而使得直流电容上的电压 u_{dc} 维持为额定值,控制原理框图如图4所示。

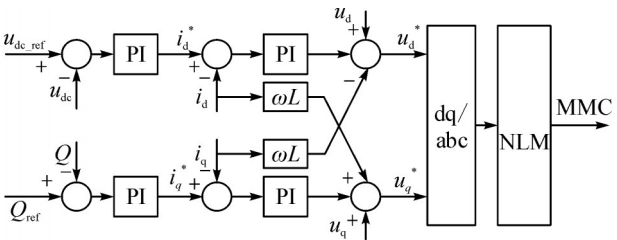


图4 定 U_{dc} 控制框图
Fig. 4 Fixed U_{dc} control diagram

图中: i_d 、 i_q 分别为电流有功、无功分量实际值; u_d 、 u_q 分别为电压的有功、无功分量实际值;带“*”分别为各电气量的参考值。 ω 、 L 分别为角频率、电感。

2)构网型控制策略设计。本文采用构网型控制中的下垂控制策略,此时换流器将以自同步方式运行,与自同步改造后的风机同时向示范区负载提供电能。通过调节换流器与风机的有功功率-频率(即 P - f)下垂系数的比值达到实现系统有功功率按比例进行分配的目标;同理,通过调节换流器与风机的无功功率-电压(Q - U)下垂系数的比值来达到实现系统无功功率按比例进行分配的目标,控制原理如图5所示。图中: P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为有功功率、无功功率参考值; K_p 、 K_Q 分别为常数; u_{sdref} 、 u_{sqref} 分别为 d 、 q 轴电压参考值; f_{ref} 为频率参考值;带“*”分别为各电气量的参考值。

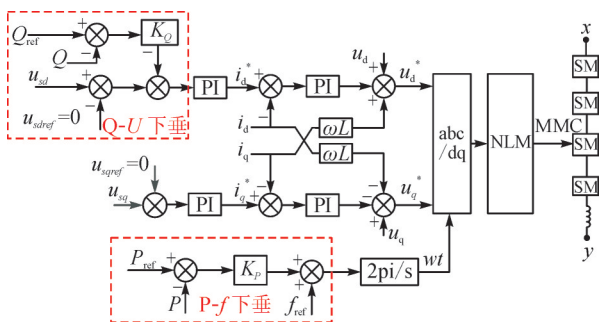


图5 构网型控制框图

Fig. 5 Grid forming control block diagram

4 硬件在环测试方案设计

4.1 硬件在环测试平台架构设计

根据前文多端口柔性互联装置拓扑结构,基于RT-LAB平台搭建柔性互联装置硬件在环(HIL)测试平台架构如图6所示。

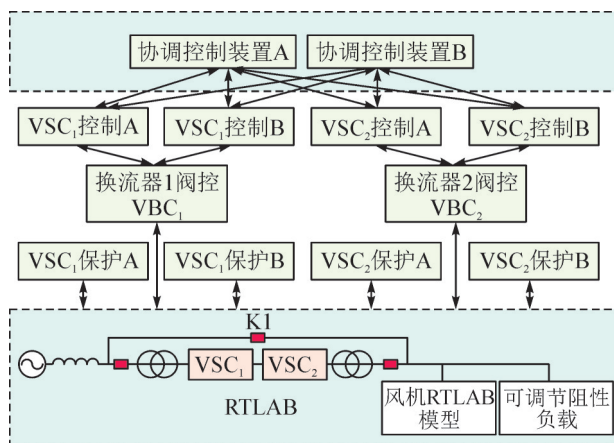


图6 基于RTLAB硬件在环测试架构

Fig. 6 Hardware-in-the-loop test architecture based on RTLAB

基于RT-LAB的柔性互联装置实时仿真-控保阀控联调平台示意如图7所示。MMC换流阀及其他主电路模型位于RTLAB平台,控保设备从RTLAB的主电路模型中获取交直流电压、电流,通过控制算法得到6个桥臂的调制波,传递给阀控设备。阀控依据调制波进行子模块均压、调制后产生MMC子模块中IGBT的驱动信号,并将驱动信号发送至RTLAB的MMC模型中,实现子模块地投切。

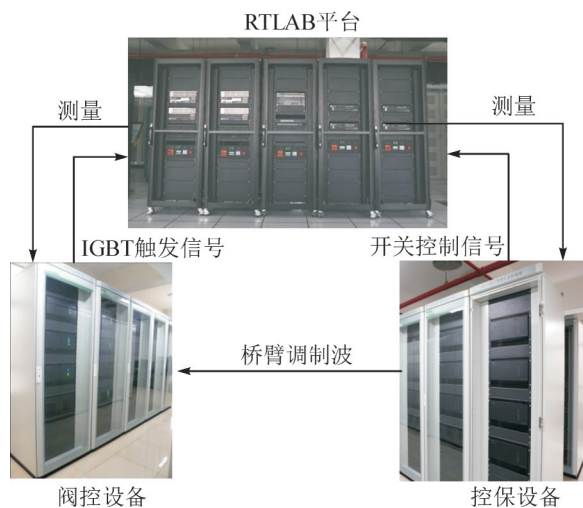


图7 基于RTLAB的柔性互联装置控保联调平台

Fig. 7 Control and protection joint debugging platform for flexible interconnection device based on RTLAB

4.2 阀基控制设备设计

阀基控制设备(value-based controller, VBC)如图8所示。主要由分段控制单元和电流控制单元构成,VBC的控制周期为 $50\mu s$,柔性互联装置的VBC系统共包含AB两套系统,采用双冗余、热备用设计方式。其中,完全双冗余结构的电流控制单元硬件相互独立;分段控制单元核心板采用完全双冗余结构,接口板A、B系统共用,VBC单桥臂控制28个子模块,VBC上下桥臂共用1个分段控制单元。每个电流单元连接6套OCT,每套OCT代表1个分段的电流情况,通过每个分段对应的OCT判断该桥臂是否过流,同时,每个电流单元具备独立的快速过流保护光纤连接至分段控制单元。

4.3 阀控策略设计

阀控策略设计用于对包含 n 个子模块的桥臂进行PWM调制或最近电平调制,使得输出电压能够尽可能精准跟随桥臂电压参考波。本平台的VBC控制策略主要包含以下几部分:

1)最近电平(nearest level modulation, NLM)电压调制策略

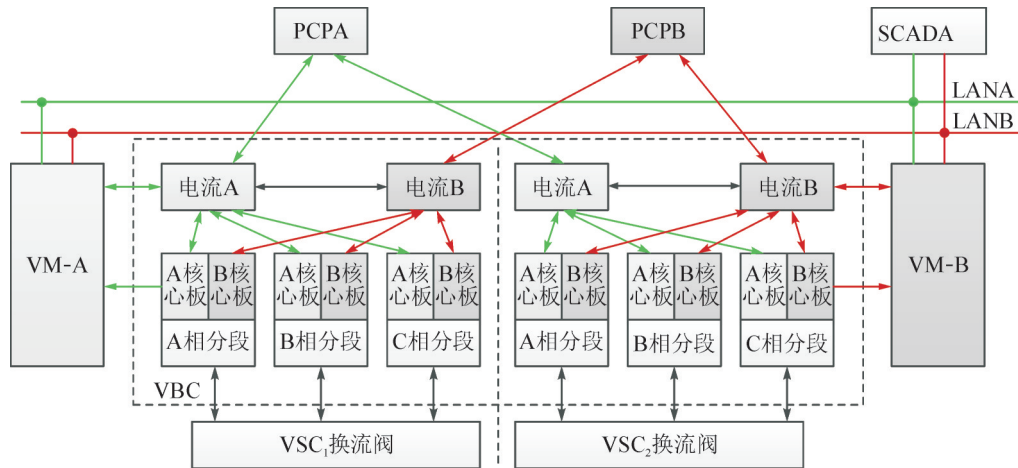


图8 VBC架构设计
Fig. 8 Design of VBC architecture

目前,研究较多且技术相对成熟的调制方法主要包括最近电平逼近调制^[19]、载波移相调制(phase-shift PWM)和载波层叠调制。基于阶梯波逼近正弦波的优点且与示范工程保持一致,本平台采用NLM调制策略。

2) 环流抑制策略

桥臂电流中所包含的二倍频负序分量会带来附加损耗、散热等一系列问题^[20-23],需要在阀控策略中设计环流抑制控制器。本文采用较成熟的常规方法,即在负序旋转坐标系下将环流分量经dq坐标数学变换成为两个直流量,通过将这两个直流量参考值设置为0并经过PI控制器后,生成负序的三相不平衡电压作为增量累加到用于子模块调制的电压参考波。

3) 阀解锁前充电策略

在换流阀解锁之前,子模块的电容充电过程包括不控充电和可控充电2个阶段^[24-26]。其中经交、直流线路给 n 个子模块同时充电的不控充电阶段完成后,相较于额定电压,子模块电容电压偏低,且由于子模块参数的分散性, n 个子模块的电容电压之间可能出现不完全一样现象。一方面,如果此时不进行均压控制而直接进行换流阀解锁操作,可能会瞬间造成较大的暂态冲击电流^[27-30];另一方面,若放任长时间维持在该状态,则某些子模块电容的电压可能出现发散直至低于特定阈值(如高电位取能电压阈值)而退出运行。因此,为了避免出现上述问题,本文在解锁之前还要采用可控均压充电策略^[31]。

4) 阀解锁后桥臂子模块电压排序均压策略

首先,将 n 个投入子模块的电压按照从小到大的顺序进行排序。然后,依据上个周期的子模块投切状态和电流方向去执行投入/切除子模块。在该

方法基础上,引入文献中“附加开关点”^[32-33]方法,该方法的目的是确保在电容的充、放电过程中电容电压值的最高值与最低值之间的差值始终被限定特定的某个临界值范围内。

4.4 实时数字仿真平台开发

本文基于RT-LAB实时数字仿真平台进行多端口柔性互联装置硬件在环测试平台的开发^[34],硬件包括一台基于CPU实时仿真器的OP5600和4台基于FPGA实时仿真器的OP5607。其中,OP5600主要用于多端口柔性互联装置系统和控制器的仿真,它的仿真步长为50 ps;而OP5607主要作用是柔性互联装置的VSC阀本体和前文所述的阀控系统的仿真,仿真步长设置为250 ns。本文测试平台及后期示范工程的换流阀和变压器关键参数分别如表2-3所示。

表2 MMC换流阀主要参数列表
Table 2 Main parameter list of MMC converter valve

参数	数值
额定直流电压/kV	±20
桥臂子模块数目	28个(含冗余3个)
子模块电容值/μF	10 000
子模块额定电压/V	1 600
桥臂额定直流电流/A	500
桥臂额定交流电流/A	866.03
桥臂电感/mH	7

表3 换流变压器参数
Table 3 Parameters of converter transformer

参数	数值	
	网侧绕组	阀侧绕组
变压器接法(YN/Δ)	YN	Δ
额定线电压/kV	110	20
额定容量/MVA	70	

5 硬件在环仿真测试

5.1 测试项目

基于前文设计方案,实验室开发了一套完整的硬件在环测试平台,图9所示为实时数字仿真器,图10所示为多端口柔性互联装置可视化操作界面,可以直观的进行充电、解锁、升降功率等一系列操作。利用该测试平台开展子模块充电过程、解锁、功率阶跃、运行方式切换、故障穿越等试验项目。通过这些测试项目的验证为后期的示范工程

施工、调试提供重要参考和技术支撑,保证工程顺利可靠投运。



图9 实时数字仿真实验室
Fig. 9 Real time digital simulation laboratory

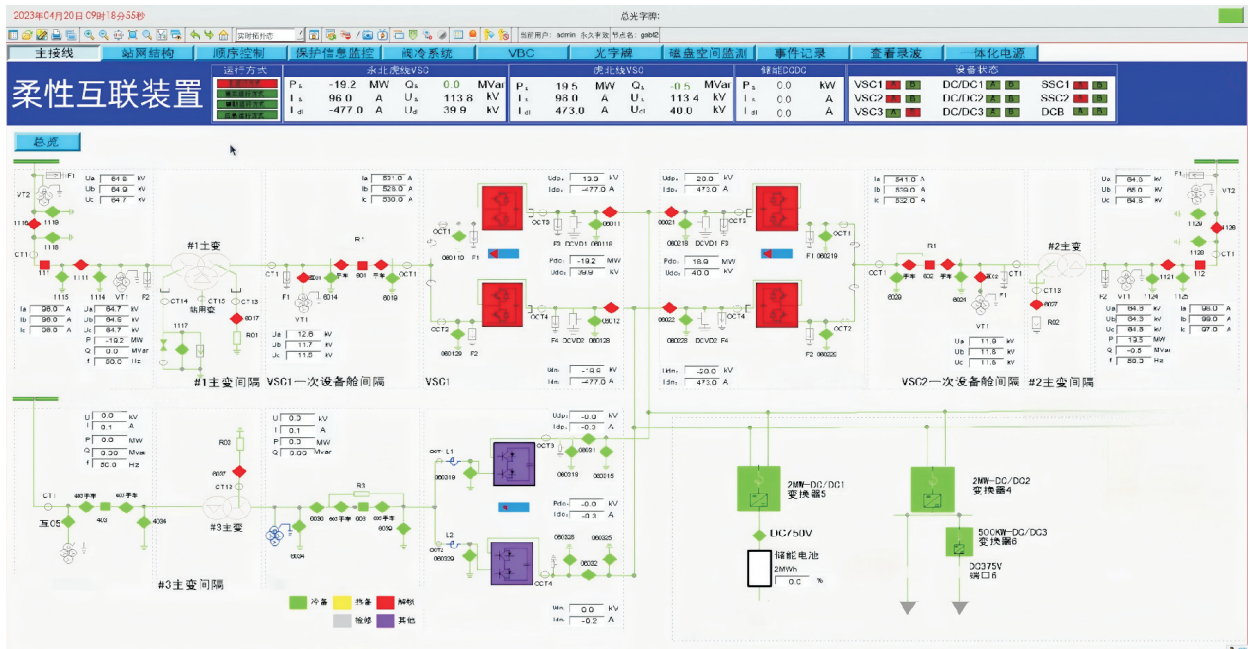


图10 可视化操作界面
Fig. 10 Visual operation interface

5.2 测试结果分析

1) 子模块充电过程

如图11所示子模块充电过程分为不控充电阶段和可控充电阶段,在第1个阶段,VSC换流阀一直处于未解锁状态,通过二极管不控整流桥进行充电,此阶段子模块电压达到1200V。然后,在0.3s进入可控充电阶段,子模块电压抬升到1400V。子模块电压波形见图11。

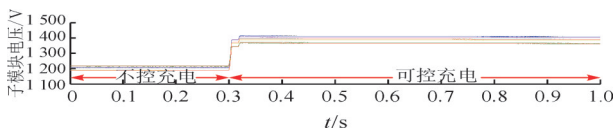


图11 子模块电压波形
Fig. 11 Voltage waveform of sub-modules

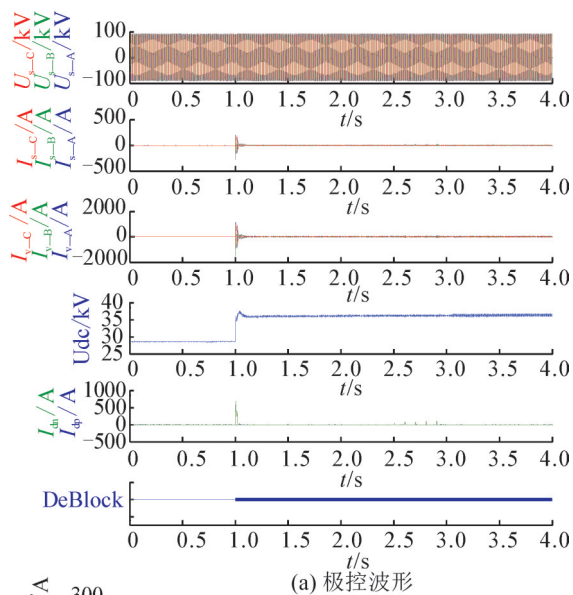
2) 解锁过程

子模块充电结束后,待系统处于稳定状态,进

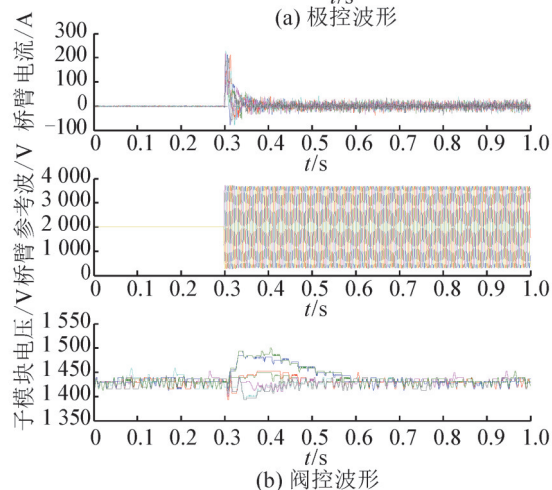
行换流阀解锁操作,解锁过程的极控和阀控相关波形分别如图12(a)和图12(b)所示。图中: $U_{s,A/B/C}$ 和 $I_{s,A/B/C}$ 分别为网侧电压和电流; $I_{v,A/B/C}$ 为阀侧电流; U_{dc} 为直流电压; I_{dp} 、 I_{dn} 为直流电流;DeBlock为解锁信号标志位。由图12(b)中子模块电压波形看出在解锁起始阶段子模块电压出现偏差,然后经阀控自主均压阶段逐渐恢复一致。

3) 阶跃试验

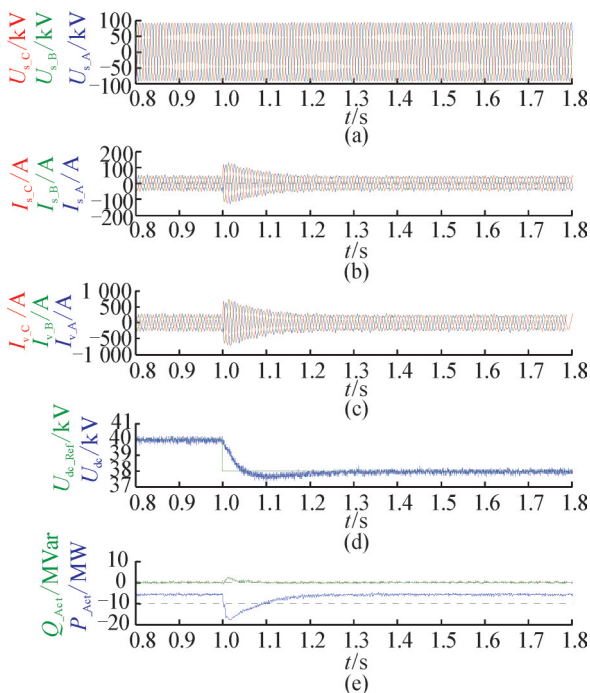
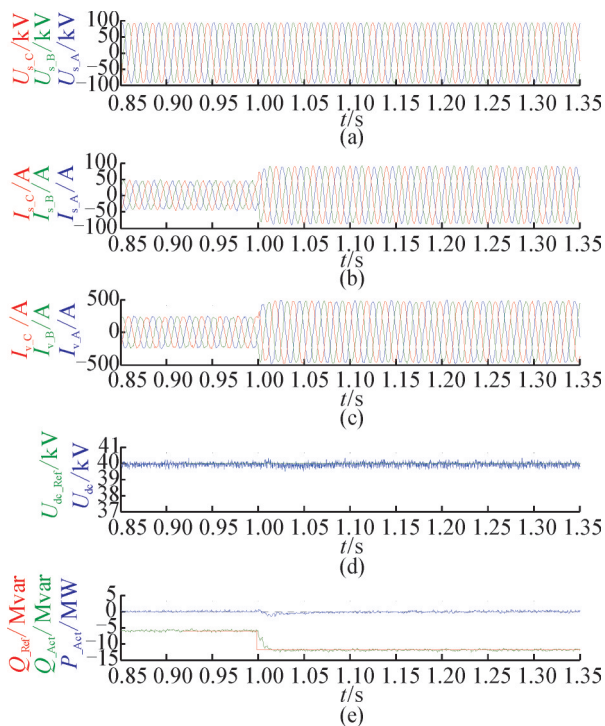
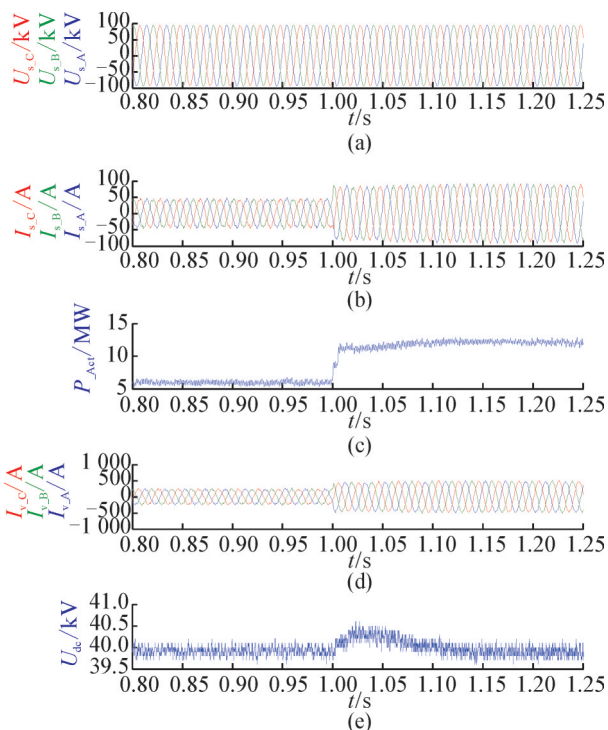
为了验证系统在阶跃工况下的稳定性,此部分开展了直流电压阶跃和有功功率、无功功率阶跃试验。测试结果分别如图13-15所示。由图13-15看出在直流电压阶跃、有功功率阶跃、无功功率阶跃过程中,直流电压和有功功率、无功功率能够快速准确跟随其指令值,在经历短暂的暂态过程后网侧/阀侧电压和电流达到新的稳定状态。



(a) 极控波形



(b) 阀控波形

图12 解锁波形(VSC₁)Fig. 12 Deblocking waveform of VSC₁图13 直流电压阶跃波形(VSC₁)Fig. 13 DC voltage step waveform of VSC₁图14 无功功率阶跃波形(VSC₂)Fig. 14 Reactive power step waveform of VSC₂图15 有功功率阶跃波形(VSC₂)Fig. 15 Active power step waveform of VSC₂

4) 孤岛/联网运行方式切换试验

图16所示为40 MW/0 Mvar工况下孤岛/联网运行方式切换试验波形。图中 P_{Act} 和 Q_{Act} 分别为实际有功功率和无功功率。由波形看出,运行方式切换过程中,交流电压、交流电流、直流电压均无明显暂态过渡过程,保证了运行方式的平稳过渡。

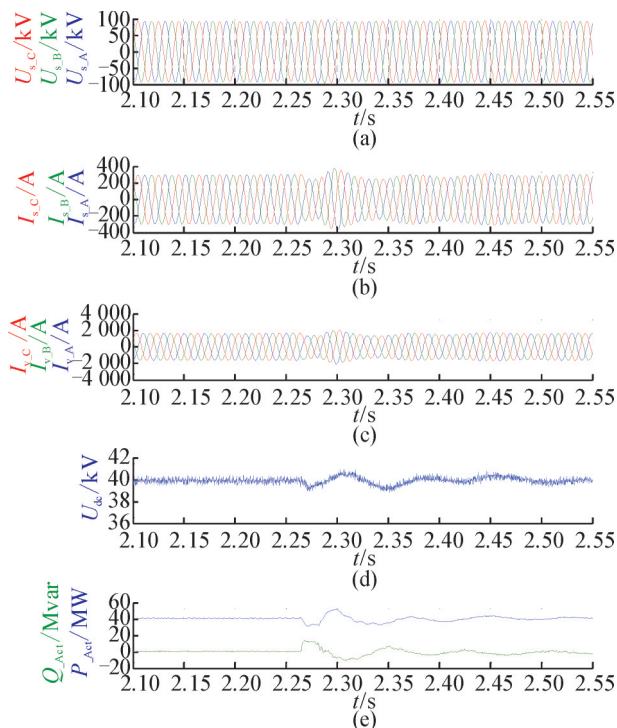


图16 运行模式切换波形

Fig. 16 Switching waveform of operation mode

5) 单相接地故障试验

为了考验整个系统在不对称故障等严苛工况下的耐受能力,通过 RT-LAB 模型中电网交流侧设置 100 ms 单相接地故障,测试结果如图 17 所示。故障穿越期间,直流电压 U_{dc} 经历暂态过程后恢复到 40 kV,换流器未出现过压和过流,在故障清除后,各电气量逐渐恢复初始状态,系统正常运行。

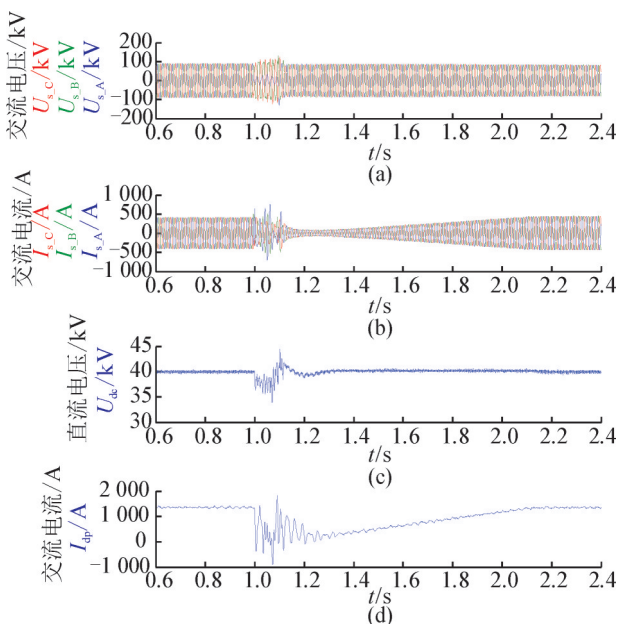


图17 单相接地故障波形

Fig. 17 Waveform of single-phase grounding fault

综合上述一系列典型工况下试验结果可知,本文研发的多端口柔性互联装置硬件在环测试平台能够全面、准确反映柔性互联装置在各种工况下的响应情况,对后期示范工程的实施提供极为重要的参考价值。

6 结语

为了支撑示范工程的实施,本文针对所提出的多端口柔性互联装置开展前期的硬件在环测试平台的开发和厂内联调试验测试。文中设计了多端口柔性互联装置控制保护系统架构和分层协调控制系统;设计了完整的硬件在环测试方案设计;最后,针对充电、解锁、电压/功率阶跃试验、孤岛/联网运行模式切换等不同典型工况开展硬件在环测试研究,通过试验波形全面证实了所搭建平台的准确性。本文硬件在环测试平台的开发为后续示范工程的顺利实施提供技术支撑,也为工程投运后复现现场问题进而探索解决方案提供更便捷手段。

参考文献

- [1] 黄雨涵,丁涛,李雨婷,等. 碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(S1): 28-51.
HUANG Yuhuan, DING Tao, LI Yuting, et al. A review of low-carbon energy technologies in the context of carbon neutrality and their implications for the development of new power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 28-51.
- [2] 王晓辉,季知祥,周扬,等. 城市能源互联网综合服务平台架构及关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2310-2320.
WANG Xiaohui, JI Zhixiang, ZHOU Yang, et al. Architecture and key technologies of urban energy internet integrated service platform[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2310-2320.
- [3] 宗升,何湘宁,吴建德,等. 基于电力电子变换的电能路由器研究现状与发展[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4559-4570.
ZONG Sheng, HE Xiangning, WU Jiande, et al. The research status and development of power routers based on power electronic conversion[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4559-4570.
- [4] ALEX Q. Renewable Energy System re-search and education at the NSF FREEDM systems center[C]//Proceeding of IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009, 1-6.
- [5] ALEX Q, MARIESA L. Crow. The future renewable electric energy delivery and management(FREEDM) system; the energy internet[C]//Proceedings of the IEEE, 2011, 133-148.

- [6] HUBER J E, KOLAR J W. Common-mode currents in multi-cell solid-state transformers[C]//Proceedings of Power Electronics Conference (ECCE Asia). Hiroshima, Japan, May 2014.
- [7] BIFARETTI S, ZANCHETTA P, WATSON A, et al. Advanced power electronic conversion and control system for universal and flexible power management [J]. IEEE Transactions Smart Grid, 2011, 2(2):231-243.
- [8] PIPOLO S, BIFARETTI S, BONAIUTO V, et al. Reactive power control strategies for UNIFLEXPM converter[C]//Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Florence, Italy: IEEE, 2016:3570-3575.
- [9] RANJEETA S, AAPALLI M S. A cascaded H-bridge multi-level inverter with reduced number of switches[J]. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering(IJTTEE), 2020, 9(12):344-347.
- [10] 张航, 李耀华, 高范强, 等. 级联H桥型电力电子变压器隔离级高频电流波动抑制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7):130-138.
ZHANG Hang, LI Yaohua, GAO Fanqiang, et al. Isolation stage high-frequency current fluctuation suppression strategy for cascaded H-bridge power electronic transformers [J]. Power System Automation, 2020, 44(7):130-138.
- [11] 陈建福, 蔡元纪, 李建标, 等. 珠海能源互联网示范项目综合能源运营服务应用[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(4):83-92.
CHEN Jianfu, CAI Yuanji, LI Jianbiao, et al. Comprehensive energy operation service application of Zhuhai energy internet demonstration project[J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(4):83-92.
- [12] 张忠瑞, 麻壮, 姜一鸣, 等. 计及柔性负荷的园区热电联储系统优化配置[J]. 东北电力技术, 2024, 45(10):44-49.
ZHANG Zhongrui, MA Zhuang, JIANG Yiming, et al. Optimal configuration of park thermoelectric reserve system considering flexible load[J]. Northeast Electric Power Technology, 2024, 45(10):44-49.
- [13] 王波, 季子越, 汪万兴, 等. 柔性互联装备中零序电压注入的相间功率均衡控制[J]. 西安工程大学学报, 2024, 38(2):34-40.
WANG Bo, JI Ziyue, WANG Wanxing, et al. Phase-to-phase power balance control in flexible interconnection equipment by injecting zero sequence voltage[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2024, 38(2):34-40.
- [14] 王小明, 徐斌, 倪静怡, 等. 基于DRO-MORO的柔性互联配电网多时间尺度优化调度[J]. 浙江电力, 2025, 44(9):102-116.
WANG Xiaoming, XU Bin, NI Jingyi, et al. Multi-timescale optimal scheduling of flexible interconnected distribution networks based on DRO-MORO[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(9):102-116.
- [15] 王子凌, 吴栋其, 马振宇, 等. 基于异常数据分类的磁控开关状态评估模型研究[J]. 浙江电力, 2025, 44(5):34-41.
WANG Ziling, WU Dongqi, MA Zhenyu, et al. Research on a status assessment model for magnetically controlled switches based on abnormal data classification[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(5):34-41.
- [16] 章勇高, 邱兴隆, 方华亮. 基于互联网技术的源荷互动配电网规划模式[J]. 电测与仪表, 2024, 61(11):148-156.
ZHANG Yonggao, QIU Xinglong, FANG Hualiang. Source and load interaction distribution network planning mode based on internet technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(11):148-156.
- [17] 张凯, 郭威, 魏新杰, 等. 能源互联网终端用户异常负荷数据辨识与修正[J]. 电测与仪表, 2024, 61(11):61-67.
ZHANG Kai, GUO Wei, WEI Xinjie, et al. Identification and correction of abnormal load data of energy internet terminal users[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(11):61-67.
- [18] 曹志刚, 丁仁杰, 崔旭东, 等. 寒旱地区分布式新能源配电网过电压控制方法[J]. 电瓷避雷器, 2024(6):53-60.
CAO Zhigang, DING Renjie, CUI Xudong, et al. Overvoltage control method of distributed new energy distribution network in cold and dry areas[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(6):53-60.
- [19] 管敏渊, 徐政, 屠卿瑞, 等. 模块化多电平换流器型直流输电的调制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2):48-52.
GUAN Minyuan, XU Zheng, TU Qingrui, et al. Nearest level modulation for modular multilevel converters in HVDC transmission[J]. Automation of Electric Power System, 2010, 34(2):48-52.
- [20] 苏成, 简翔浩, 孔志达, 等. 基于IGCT器件的配电网柔性直流互联策略[J]. 南方能源建设, 2024, 11(6):183-190.
SU Cheng, JIAN Xianghao, KONG Zhida, et al. Flexible interconnection strategy of distribution network based on IGCT [J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(6):183-190.
- [21] 季柯, 孔明, 庞辉, 等. 模块化柔直换流器内部环流振荡机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16):5302-5314.
JI Ke, KONG Ming, PANG Hui, et al. Research on the internal circulation oscillation mechanism of modular flexible direct converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16):5302-5314.
- [22] 王举重, 白海东, 刘浩, 等. 三相PWM整流器低开关频率分层模型预测控制 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(5):119-129.
WANG Juzhong, BAI Haidong, LIU Hao, et al. Low switching frequency multi-layered model predictive control strategy for three-phase PWM rectifier [J]. Southern Energy Con-

- struction, 2025, 12(5): 119-129.
- [23] 屠卿瑞, 徐政, 郑翔, 等. 模块化多电平换流器型直流输电内部环流机理分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 547-552.
TU Qingrui, XU Zheng, ZHENG Xiang, et al. Mechanism analysis on the circulating current converter based HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 547-552.
- [24] 刘志远, 何家欣, 李江涛, 等. 特高压直流换流站多柱并联避雷器组局部故障机理研究[J]. 电瓷避雷器, 2024(5): 54-61.
LIU Zhiyuan, HE Jiaxin, LI Jiangtao, et al. Local fault mechanism of multi-column in-parallel surge arresters in uhv dc converter station[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(5): 54-61.
- [25] 左中秋, 王陆璐, 黄佳瑞, 等. ± 800 kV 特高压直流换流站 EM 避雷器关键性能分析及建议[J]. 电瓷避雷器, 2025(5): 36-45.
ZUO Zhongqiu, WANG Lulu, HUANG Jiarui, et al. Key performance indicators and recommendations for the em surge arrester of the ± 800 kV UHV DC converter station[J]. Insulators and Surge Arresters, 2025(5): 36-45.
- [26] 李国友, 施勇, 邹德旭, 等. 换流变压器网侧套管典型电连接结构振动失效特性试验及分析[J]. 电瓷避雷器, 2025(1): 133-142.
LI Guoyou, SHI Yong, ZOU Dexu, et al. Vibration failure characteristics test of typical electric connection structure of converter transformer grid-side bushing[J]. Insulators and Surge Arresters, 2025(1): 133-142.
- [27] 李正, 陈堂贤, 张赟宁, 等. 基于 ISSA-BiLSTM 的多端柔性直流输电线路保护方案[J]. 电测与仪表, 2025, 62(4): 97-104.
LI Zheng, CHEN Tangxian, ZHANG Yunning, et al. Protection scheme of flexible MTDC transmission line based on ISSA-BiLSTM[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(4): 97-104.
- [28] 孙志媛, 陈晓溪, 彭博雅, 等. 满足低电压穿越要求的光伏并网逆变器混合控制策略[J]. 西安工程大学学报, 2025, 39(6): 120-127.
SUN Zhiyuan, CHEN Xiaoxi, PENG Boya, et al. Hybrid control strategy for photovoltaic grid-connected inverters meeting low voltage ride through requirements[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2025, 39(6): 120-127.
- [29] 曹玉石, 张慧媛, 许军, 等. 基于行波相位特征的海上风电柔直电缆故障保护方法的研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(7): 81-87.
CAO Yushi, ZHANG Huiyuan, XU Jun, et al. Research on cable fault protection method of flexible and straight system based on traveling wave phase characteristics title[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(7): 81-87.
- [30] 侯荣荣, 刘辉, 文武洲, 等. 基于 CEEMDAN-ISMA-BiLSTM 网络的中期电力负荷预测[J]. 西安工程大学学报, 2025, 39(4): 89-96.
HOU Rongrong, LIU Hui, WEN Wuzhou, et al. HUANG Jian. Medium-term power load forecasting based on CEEMDAN-ISMA-BiLSTM network[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2025, 39(4): 89-96.
- [31] 裘鹏, 杨美娟, 章姝俊, 等. MMC-MTDC 系统协调启动控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1800-1807.
QIU Peng, YANG Meijuan, ZHANG Shujun, et al. Coordinated start-up strategy for MMC-MTDC system[J]. power system technology, 2015, 39(7): 1800-1807.
- [32] 丁冠军, 丁明, 汤广福, 等. 新型多电平 VSC 子模块电容参数与均压策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 1-6.
DING Guanjuan, DING Ming, TANG Guangfu, et al. Sun-module capacitance parameter and voltage balancing scheme of a new multilevel VSC modular[J]. Proceeding of the CSEE, 2009, 29(30): 1-6.
- [33] 刘高任, 徐政, 薛英林, 等. 基于动态冗余度的模块化多电平换流器子模块投入策略[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2564-2571.
LIU Gaoren, XU Zheng, XUE Yinglin, et al. Optimized control strategy based on dynamic redundancy for modular multilevel converter[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2564-2571.
- [34] 路建良, 贺之渊, 唐茹彬, 等. 柔性直流输电阀基控制设备硬件在环测试方法[J]. 中国电力, 2021, 54(1): 62-69.
LU Jianliang, HE Zhiyuan, TANG Rubin, et al. Hardware in the loop testing method for flexible DC transmission valve based control equipment[J]. China Electric Power, 2021, 54(1): 62-69.

作者简介:

夏琦璋(1990—), 男, 工程师, 主要从事电力电子技术工作。E-mail: wozaijia1023@163.com。